

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Développement d'un modèle de réponse de flamme pour la simulation thermo-acoustique d'un écoulement réactif dans la chambre d'un statomixte Bas-Mach à col thermique

Référence : **MFE-DMPE-2026-11**

Début de la thèse : Octobre 2026

Date limite de candidature : Juin 2026

Mots clés : Acoustique, Thermo-acoustique, Aérothermique, Statoréacteur, Statomixte, col thermique, Propulsion Aérobie, véhicule hypersonique

Profil et compétences recherchées :

Diplôme d'Ingénieur ou Master en mécanique des fluides, avec spécialité en acoustique et aérothermique.

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

Sujet : Dans un contexte de montée en tension entre les superpuissances mondiales, le développement de véhicules hypersoniques, dépassant le nombre de Mach de vol au voisinage de 5, est devenu un enjeu primordial. Pour cette gamme de vitesse de vol, la solution propulsive optimale repose sur le concept de statomixte, capable de produire une poussée sans nécessiter de pièce mobile. Au-delà du nombre de Mach de vol 7, le superstatoréacteur, à combustion supersonique, devient plus performant que le statoréacteur, à combustion subsonique, limité à cause des fortes pertes de charge, des effets de la dissociation des produits de réaction et des contraintes thermomécaniques. Le statomixte, passant d'un régime de combustion à l'autre, est une solution pour garantir des performances optimales sur une large plage de nombre de Mach de vol [1]. Le concept usuel du statoréacteur considère une tuyère à col géométrique. Cependant, cette solution technique n'est pas adaptée au mode superstatoréacteur, nécessitant une combustion supersonique en amont de la tuyère d'éjection. En utilisant une tuyère à col thermique, consistant à accélérer l'écoulement sous l'effet du dégagement de chaleur de la combustion dans une tuyère divergente, la transition entre les deux régimes de combustion s'effectue sans contrainte (Figure 1).

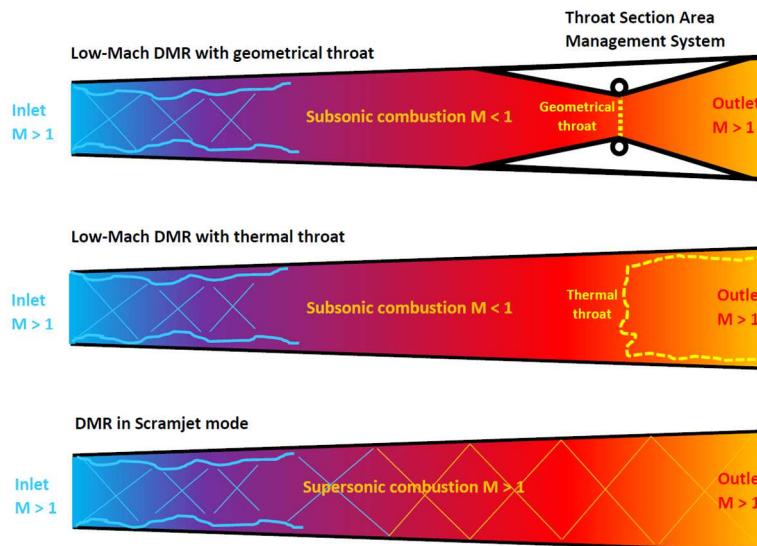


Figure 1: Chambre d'un statomixte bas-Mach [2].

Problématique commune à tous les systèmes propulsifs, les instabilités de combustion constituent un des phénomènes les plus critiques. Les instabilités de combustion dans un statoréacteur ont pour principales conséquences l'extinction de flamme, l'amplification des flux thermiques aux parois et,

pour certains types d'instabilité, le désamorçage de la prise d'air [2]. La très forte complexité des interactions entre les phénomènes multi-physiques et la configuration du moteur rend très difficile l'analyse des instabilités de combustion, conduisant le concepteur à utiliser des dispositifs stabilisateurs et à restreindre le domaine de vol. Pour s'affranchir de ces contraintes, la maîtrise de ces instabilités est donc indispensable.

Pour les étudier, les sources et les frontières acoustiques doivent d'abord être déterminées. Dans le cas d'un statomixte en régime subsonique, le col thermique isole acoustiquement l'aval de la chambre par le passage subsonique-supersonique de l'écoulement. En particulier, l'impact de l'usage d'une tuyère à col thermique, par rapport à celle à col géométrique, sur le phénomène des instabilités de combustion reste une question ouverte et pratiquement non abordé dans la littérature. Le couplage entre la réponse du train de choc avec la réponse de la flamme et celle du col thermique doit également être considéré pour traiter la question des instabilités de combustion du statomixte.

A cette fin, l'ONERA a initié récemment, au sein de l'unité de modélisation de propulsion aérobie, des travaux focalisés sur la réponse linéaire aéro-acoustique d'une tuyère à col thermique et le développement d'une condition limite acoustique au col thermique (Cf. thèse F. Olivon) [3,4,5,6]. Pour ces travaux, le train de choc en entrée de chambre a été négligé dans un premier temps et la représentation de la combustion a été simplifiée pour se focaliser sur la réponse acoustique du col thermique. De cette manière, Olivon *et al.* [5,6,7] ont mis en évidence une réponse acoustique typique du col thermique par rapport au col géométrique. Puis, en couplant le modèle obtenu avec un modèle empirique de réponse de flamme pré-mélangé établi par Dowling [8], Olivon *et al.* ont montré que la dynamique de flamme amplifiait significativement les ondes acoustiques se propageant vers l'amont, en comparaison avec le cas d'un taux de dégagement de chaleur fixe. L'altération de la réponse acoustique se présente principalement aux basses fréquences, pour lesquelles le temps caractéristique de la flamme est inférieur au temps de l'écoulement. Dans le domaine paramétrique identifié comme celui du statoréacteur, les configurations les plus instables, constatées pour des vitesses de flamme élevées, sembleraient improbables. Cependant, ce résultat a été obtenu avec un modèle de flamme présentant de nombreuses limitations pour une application dans une chambre de statomixte. En particulier, le modèle suppose un écoulement à faible vitesse ($M < 0.3$ [8,9]) dans pour un accroche-flamme central cylindrique, ne prenant en compte que la convection des fluctuations de vitesse de la zone de l'accroche-flamme et ne considérant pas les effets non-linéaires des oscillations de la flamme ni le caractère hétérogène de la distribution des zones réactives. Ainsi, un modèle de réponse de flamme beaucoup plus réaliste est nécessaire.

L'objectif de la thèse est donc, dans un premier temps, d'améliorer la modélisation du couplage entre un col thermique et une flamme de statomixte. Pour cela, un modèle de flamme basé sur des simulations haute-fidélité de statomixte sera développé et couplé avec le modèle de col thermique développé lors de la précédente thèse. Le modèle de réponse de flamme aura la particularité de considérer une distribution spatiale du taux de dégagement de chaleur dans un écoulement unidimensionnel fortement compressible. Le modèle sera établi à partir de simulations CEDRE, le code multi-physique de l'ONERA, dans des configurations académiques, dans un premier temps. Le modèle prendra en compte la qualité de mélange (richesse, homogénéité), les effets de compressibilité et le type de flamme (combinaison de flammes pré-mélangé et de diffusion). Un modèle d'accroche flamme y sera intégré. Le modèle aéro-acoustique développé lors de la précédente thèse sera éventuellement adapté en fonction de la complexité du couplage modélisé.

Le couplage sera ensuite validé à partir de résultats de simulation CFD d'un cas réaliste de statomixte.

Pour répondre à l'objectif de la thèse, une comparaison entre deux configurations de statomixte, dont l'une dispose d'un col thermique et l'autre d'un col géométrique, sera effectuée, analysée et évaluée. Si l'avancement de la thèse le permet, on traitera ensuite la modélisation de la réponse du train de choc amont, toujours suivant une approche théorique et numérique, dans le but d'étudier les instabilités dans l'intégralité de la chambre de statomixte.

[1] Curran, Edward T., and Stull, Frank D. The utilization of supersonic combustion ramjet systems at low Mach numbers. Research and Technology Div Bolling AFB DC, 1964.

[2] Laurence, S.J., Karl, S., Martinez Schramm, J. et Hannemann, K., Transient fluid-combustion phenomena in a model scramjet. Journal of Fluid Mechanics, 722 :85-120, 2013. doi: 10.1017/jfm.2013.56.

- [3] Olivon, F., Durand, J.-É., Genot, A., and Piot, E. « Unsteady Forced Motion of the Thermal Throat in a Low-Mach Dual-Mode Ramjet Nozzle ». In : EUCASS-3AF. 2023, p. 558. doi: 10.13009/EUCASS2023-558.
- [4] Olivon, F., Durand, J.-É., Genot, A., and Piot, E. « High-Frequency Acoustic Propagation in a Thermally Choked Low-Mach Dual-Mode Ramjet ». In: 30th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Rome, Italy, 2024. doi: 10.2514/6.2024-3114.
- [5] Olivon, F., Genot, A., Durand, J.-É., Hirschberg, A., and Piot, E. On the linear aero-acoustic response of a thermally-choked-flow nozzle to acoustic and entropy plane waves, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 626, 2026, 119619, ISSN 0022-460X, doi:10.1016/j.jsv.2025.119619.
- [6] Olivon, F., Genot, A., Durand, J.-É., Hirschberg, A., and Piot, E. « A quasi-one-dimensional critical-throat acoustic boundary condition for thermally choked dual-mode ramjet nozzles ». *Acta Acust. 9* 80 (2025), doi: 10.1051/aacus/2025064.
- [7] Olivon, F., Genot, A., Durand, J.-É., and Piot, E., Thermo-acoustic instabilities linear study of a canonical thermally choked-flow nozzle, *Journal of Propulsion and Power*, 2026, In: Submitted
- [8] Dowling A. P., A kinematic model of a ducted flame. *Journal of Fluid Mechanics*. 1999;394:51-72. doi:10.1017/S0022112099005686.
- [9] Macquisten, M.A., Dowling, A.P., Low-frequency combustion oscillations in a model afterburner, *Combustion and Flame*, Volume 94, Issue 3, 1993, Pages 253-264, ISSN 0010-2180, doi: 10.1016/0010-2180(93)90072-B.

Collaborations envisagées: LMFA

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Multi-Physique pour l'Energétique

Lieu (centre ONERA) : Palaiseau

Contact : Jean-Étienne Durand

Tél. : 01 80 38 62 53 Email : jean-etienne.durand@onera.fr,

Directeur de thèse

Nom : Christophe Bailly

Laboratoire : LMFA

Tél. : 04 72 18 67 29

Email : christophe.bailly@ec-lyon.fr

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>